

## علمی- پژوهشی

## طراحی و تحلیل الکترومغناطیسی سامانه کویل گان القایی سه طبقه به روش اجزاء محدود

مهدی بهاروند<sup>۱</sup>، آرش دهستانی کلاگر<sup>۲\*</sup>، محمدرضا علیزاده پهلوانی<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر

(دریافت: ۹۸/۱۲/۱۰، پذیرش: ۹۹/۰۳/۲۲)

## چکیده

این مقاله به طراحی و تحلیل الکترومغناطیسی سامانه کویل گان القایی سه طبقه می پردازد. در ابتدا، تئوری عملکرد سامانه کویل گان چندطبقه به اختصار معرفی شده و سپس یک شبیه سازی گذرا از حرکت پرتابه، جهت تحلیل و محاسبه ولتاژ، جریان، نیرو، سرعت و شتاب سامانه کویل گان با استفاده از نرم افزار تحلیل اجزا محدود ANSYS Maxwell انجام می گیرد. جهت اعتبارسنجی پرتاب گر الکترومغناطیسی طراحی شده، با استفاده از معادلات حالت آن، سامانه را در نرم افزار MATLAB شبیه سازی کرده و نتایج حاصل از تحلیل الکترومغناطیسی با نتایج به دست آمده از روابط تحلیلی، مقایسه شده است. سامانه طراحی شده دارای بازه حدود ۳۱ درصد است که قادر است یک جسم ۲۱/۶ کیلوگرمی را با سرعت دهانه خروجی  $109 \text{ m/s}$  پرتاب نماید. ویژگی های طراحی و نتایج تجزیه و تحلیل مربوط به کویل گان می تواند به طور مؤثر برای توسعه یک سامانه کویل گان با مقیاس بزرگ به کار گرفته شود.

**کلیدواژه ها:** کویل گان القایی، تحلیل الکترومغناطیسی، کویل گان چندطبقه. منبع توان پالسی.

## ۱. مقدمه

وقتی که پالس جریان از سیم پیچی عبور می کند، اثر متقابل بین میدان مغناطیسی و جریان القاشده درون پرتابه (آرمیچر)، یک نیروی محوری ایجاد می نماید که پرتابه را در طول لوله به حرکت درمی آورد [۹]. اگرچه اصول عملکرد کویل گان ساده است، اما تحلیل فرآیند گذرای الکترومغناطیسی پرتاب در کویل گان، شناخت تأثیر پارامترهای اصلی و بهینه سازی طراحی، دارای پیچیدگی هایی می باشد [۱۰]. پرتاب گرهای الکترومغناطیسی با توان پالسی نسبت به پرتاب گرهای شیمیایی برتری دارند و این توانایی را دارند که از نیروی الکترومغناطیسی جهت سرعت بخشیدن به آرمیچر استفاده کنند [۱۱-۱۳]. در این راستا، سامانه کویل گان القایی چندطبقه، موضوعی است که در سالیان اخیر مورد توجه محققین قرار گرفته است. به طور خاص، در کویل گان القایی، تقریباً هیچ تماس فیزیکی بین لوله کویل گان و پرتابه وجود ندارد. به همین جهت، این نوع کویل گان دارای طول عمر طولانی تر و همچنین کارایی بالاتر در مقایسه با دیگر انواع پرتاب گرهای الکترومغناطیسی می باشد [۱۴-۱۸]. جهت تحلیل الکترومغناطیسی سامانه فوق، روش تحلیل اجزای محدود سه بعدی، یک ابزار دقیق و جزئی مناسب است؛ اما نمی تواند مسئله را به سرعت حل کند. زیرا زمان تحلیل به دلیل وجود ساختارهای هندسی پیچیده افزایش می یابد. بنابراین لازم است که از تحلیل دوبعدی جهت حصول اطمینان از صحت و اعتبار مسئله استفاده شود [۱۹-۲۰]. بازه متداول یک کویل گان

فناوری پرتاب کننده های الکترومغناطیسی یک راهکار مناسب جهت پرتاب اجسام با سرعت های بالا در مسافت های طولانی می باشد. پرتاب گر کویل گان یک نوع خاص از پرتاب کننده های الکترومغناطیسی است که از مدار تحریک توان متوسط استفاده می کند [۱]. پرتاب گرهای الکترومغناطیسی نسبت به سلاح های شیمیایی مزایای قابل توجهی دارند چون آن ها از نیروی الکترومغناطیسی برای شتاب بخشیدن به پرتابه ها استفاده می کنند. یکی از کاربردهای رایج این پرتاب گرها در حمل و نقل مسافر است که برای نمونه در متروی چین می توان مشاهده کرد. در آزمایشگاه ملی سندیا نیز بر روی خصوصیات کاری نمونه اولیه کویل گان در آمریکا تحقیقاتی صورت پذیرفته است. یکی از اولین سامانه های کویل گان، توسط همین آزمایشگاه ارائه شده است که توانست جسمی با جرمی بین ۵ گرم تا چند کیلوگرم را با سرعت  $1 \text{ km/s}$  پرتاب کند [۸-۲]. کویل گان شامل سیم پیچی هایی جدا از هم است که به دور یک لوله دی الکتریک توخالی پیچیده شده اند. پرتابه به دلیل وجود کوپلینگ بین سیم پیچی استاتور و آرمیچر (پرتابه)، در داخل این لوله به حرکت درمی آید. مدار بانک های خازنی، به سیم پیچی ها متصل بوده و به صورت هم تراز پالس های جریانی را وارد سیم پیچی های طبقات مختلف می کنند.

\* رایانامه نویسنده پاسخگو: a\_dehestani@mut.ac.ir

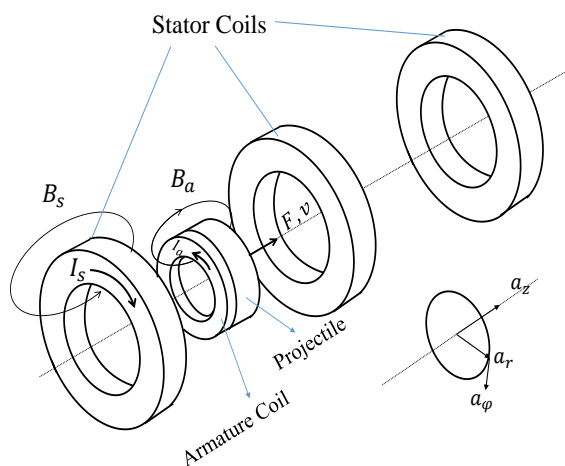
به واسطه اندوکتانس متقابل و جریان سیم پیچی ها تولید می شود. در سامانه مذکور، سیم پیچی های استاتور نیروهای دافعه و انبساطی اعمال می کنند. در حالی که سیم پیچی آرمیچر، نیروی پرتاب کننده و همچنین نیروی انقباضی وارد می سازد. شکل (۲) جریان استاتور و میدان مغناطیسی آن و همچنین جریان القا شده آرمیچر و میدان تولید شده توسط آن را نشان می دهد. شکل (۳) نیز نیروها را بر روی یک جفت سیم پیچی که در حال دفع کردن یکدیگر هستند نشان می دهد. از برهم کنش میدان مغناطیسی تولید شده توسط استاتور با جریان آرمیچر، نیروی وارد بر آرمیچر و همچنین از برهم کنش میدان مغناطیسی آرمیچر و جریان استاتور، به استاتور نیرو وارد می شود. علاوه بر نیروی پیشران، هم در آرمیچر و هم در استاتور، نیروهای شعاعی نیز وجود دارند. به آرمیچر نیروهای شعاعی درونی اعمال می شود؛ در حالی که استاتور باید نیروهای شعاعی بیرونی را تحمل کند. این نیروهای شعاعی مخالف باعث قرارگیری سیم پیچ آرمیچر در مرکز استاتور و ایجاد پرتابی بدون تماس می شود. معادلات (۱-۳) توصیف کننده نیرو و سرعت سامانه کوئل گان القایی، برحسب گردانان اندوکتانس متقابل و جریان استاتور و آرمیچر می باشند [۲۲].

$$i_s i_a \frac{dM}{dz} = F_z \quad (1)$$

$$ma_z = m \frac{dv}{dt} = F_z \quad (2)$$

$$v = \int_0^t a_z dt = \int_0^t \frac{1}{m} \frac{dM}{dz} i_s i_a dt \quad (3)$$

که در آن، گردانان اندوکتانس متقابل بوده،  $i_s$  جریان استاتور،  $i_a$  جریان آرمیچر می باشد،  $F_z$  نیروی پرتابه،  $m$  جرم پرتابه،  $v$  سرعت پرتابه،  $a_z$  شتاب جسم و  $t$  زمان پرتاب است.



شکل (۱): شمایی از کوئل گان القایی و عملکرد آن.

چندطبقه در حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد است. بهبود بازده آن به دلیل سامانه کنترل پیچیده و زمان کوتاه موجود برای انتقال انرژی در هر طبقه، کار دشواری است [۲۱]. در این مقاله، طراحی و تحلیل الکترومغناطیسی مربوط به سامانه کوئل گان القایی چندطبقه ارائه می شود. نتایج متناظر، با استفاده از نرم افزار تحلیل اجزا محدود ANSYS MAXWELL به دست آمده اند. در این پژوهش، از نرم افزار MATLAB نیز به منظور طراحی و حل معادله حالت سامانه کوئل گان القایی، با توجه به منبع توان پالسی استفاده شده است. برای افزایش اندوکتانس متقابل و نیرو، در پرتابه نیز از سیم پیچی استفاده شده است. ابتدا در قسمت ۲ اساس عملکردی کوئل گان توضیح داده شده است سپس مدل فیزیکی سامانه را استخراج و برای آن مدار تحریکی ارائه شده است. در قسمت ۳ نتایج شبیه سازی پارامترهای همچون ولتاژ، جریان، نیرو، سرعت، شتاب و بازده در سامانه کوئل گان چندمرحله ای، به کمک یک تحلیل الکترومغناطیسی بررسی شده اند. بر اساس نتایج تحلیل الکترومغناطیسی، ساختار سامانه کوئل گان، از جمله سیم پیچی استاتور، سیم پیچی آرمیچر و قطعات پشتیبان استخراج شده اند. نتایج تجزیه و تحلیل الکترومغناطیسی نیز با نتایج حاصل از روش تحلیلی مورد مقایسه قرار گرفته اند. در قسمت ۴ به نتیجه گیری مقاله پرداخته شده است.

## ۲. طراحی سامانه کوئل گان القایی

### ۲-۱. اساس عملکرد سامانه کوئل گان القایی

پرتاب کننده های الکترومغناطیسی از نوع کوئل گان را می توان از لحاظ سازوکار عملکرد، به دو دسته اساسی تقسیم بندی نمود. دسته اول، کوئل گان رلوکتانسی است که از ویژگی جاذبه فرومغناطیسی برای تولید شتاب استفاده می کند. در این پرتاب گر نیروی وارد شده به جسم فرومغناطیسی باعث می شود که پرتابه به سمت مرکز سیم پیچی استاتور حرکت کند تا مقدار رلوکتانس بین سیم پیچی استاتور و پرتابه کمتر شود. دسته دوم نیز کوئل گان القایی است که در آن نیروی شتاب دهنده به صورت یک نیروی دفع کننده عمل می کند. این نیرو ناشی از جریان های گردابی است که در اثر عبور جریان از سیم پیچی استاتور، در پرتابه ایجاد می شود. قابل ذکر است که مقاله حاضر بر کوئل گان القایی تمرکز دارد. بنابراین پرتابه باید دارای ساختاری از جنس مواد هادی مانند مس یا آلومینیوم باشد. در این نوع کوئل گان، موقعیت شروع پرتابه باید کمی از مرکز سیم پیچی استاتور بالاتر باشد. در غیر این صورت، هنگامی که جریان از سیم پیچی استاتور عبور داده می شود، پرتابه یک نیروی خالص را تجربه نمی کند. شکل (۱) شمایی از ساختار اصلی و تئوری پرتاب پرتابه را نشان می دهد. یکی از مهم ترین اصول طراحی، زمان بندی صحیح و شکل دهی جریان پالس است. نیروی لورنتز عامل رانش نیز

در سیم‌پیچی‌های استاتور طبقه دوم و سوم، جریانی القا نمی‌کند. زیرا دیود هرزگرد از عبور جریان مخالف جلوگیری می‌کند. بنابراین، آرمیچر تنها با نیروی دافعه شتاب می‌گیرد. پس از حرکت پرتابه هنگامی که مرکز سیم‌پیچی آرمیچر به نقطه مورد نظر جهت روشن کردن طبقه بعدی برسد، کلید مربوط به آن طبقه، وصل می‌شود تا جریان از سیم‌پیچی استاتور عبور نماید. این جریان در ابتدا نیرویی در خلاف جهت حرکت پرتابه به آن وارد می‌کند اما چون پرتابه دارای سرعت اولیه بوده و نیروی طبقه قبلی نیز به آن وارد می‌شود، تأثیر منفی کمی بر روی حرکت پرتابه می‌گذارد و وقتی که مرکز پرتابه از سیم‌پیچی استاتور عبور می‌کند جهت نیروی طبقه مربوطه، در جهت حرکت پرتابه قرار می‌گیرد و باعث افزایش سرعت پرتابه می‌شود. این استدلال برای هر طبقه و طبقه بعدی در کویل‌گان چندطبقه معتبر است. کل نیروی وارد شده به آرمیچر با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$F_z = \sum_{k=1}^n \frac{dM_{ak}}{dz} i_{sk} i_a \quad (4)$$

در رابطه فوق داریم:

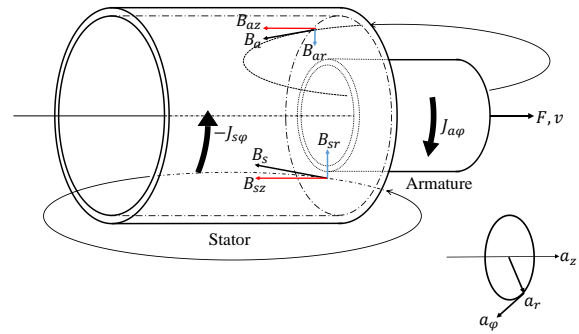
$$\frac{dM}{dz} = \sum_{i=1}^{N_1-L_1} \sum_{j=1}^{N_2-L_2} \frac{\mu_0 k_{ij} h_{ij}}{4(1-k_{ij}^2) \sqrt{r_{sij} r_{pij}}} \left[ 2(1-k_{ij}^2) K(k_{ij}) + (2-k_{ij}^2) E(k_{ij}) \right] \quad (5)$$

که عبارت بالا خود از مجموعه روابط (۶) حاصل می‌شود:

$$M = \sum_{i=1}^{N_1-L_1} \sum_{j=1}^{N_2-L_2} -\mu_0 \sqrt{r_{sij} r_{pij}} \left[ \left( k_{ij} - \frac{2}{k_{ij}} \right) K(k_{ij}) + \frac{2}{k_{ij}} E(k_{ij}) \right], \quad (6)$$

$$k_{ij} = \frac{2\sqrt{r_{si} r_{pj}}}{\sqrt{(r_{si} + r_{pj})^2 + h_{ij}^2}}$$

که در آن،  $K(k)$  و  $E(k)$  انتگرال‌های بیضوی نوع اول و دوم هستند. به علاوه،  $i$  اندیس سیم در سیم‌پیچی استاتور و  $j$  اندیس زامین سیم در سیم‌پیچی آرمیچر بوده و شعاع سیم در سیم‌پیچی استاتور،  $r_{pij}$  شعاع سیم در سیم‌پیچی آرمیچر،  $h_{ij}$  فاصله بین سیم  $i$ ام در سیم‌پیچ استاتور و سیم  $j$ ام در سیم‌پیچ آرمیچر و  $k_{ij}$  فاصله بین زامین سیم در سیم‌پیچی استاتور و زامین سیم در سیم‌پیچی آرمیچر می‌باشد. پارامترهای  $L_1$  و  $L_2$  نیز به ترتیب تعداد لایه سیم‌پیچی‌های استاتور و آرمیچر بوده و  $N_1$  و  $N_2$  نیز تعداد دورهای سیم‌پیچی استاتور و آرمیچر در هر



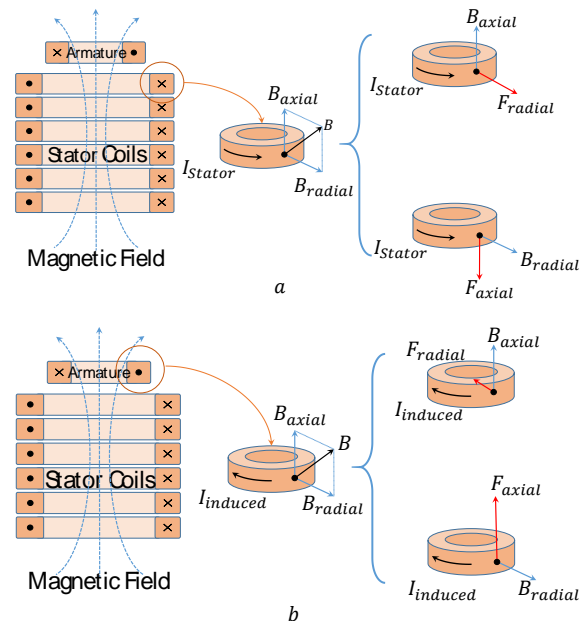
نیروی وارد بر آرمیچر بر اساس مؤلفه‌های چگالی جریان و میدان مغناطیسی

نیروی وارد بر آرمیچر بر اساس مؤلفه‌های چگالی جریان و میدان مغناطیسی

$$-J_{s\phi} \times -B_{az} = f_{sr} \quad J_{a\phi} \times -B_{sz} = -f_{ar}$$

$$-J_{s\phi} \times -B_{ar} = -f_{sz} \quad J_{a\phi} \times -B_{sr} = f_{az}$$

شکل (۲): ساختار اصلی کویل‌گان القایی و عملکرد آن.



شکل (۳): جهت نیرو بر اساس جریان سیم‌پیچ و میدان مغناطیسی، (الف) جهت نیرو در سیم‌پیچ استاتور، (ب) جهت نیرو در سیم‌پیچ آرمیچر.

## ۲-۲. مدل فیزیکی کویل‌گان القایی چندطبقه

نیروی دافعه بین اولین استاتور و آرمیچر وقتی ظاهر می‌شود که شبکه توان پالسی که به طبقه اول متصل است، جریان را به سیم‌پیچی استاتور انتقال دهد. جریان استاتور یک میدان مغناطیسی قوی تولید می‌کند که این میدان جریانی را در سیم‌پیچی آرمیچر القا می‌کند. در این لحظه، جهت جریان آرمیچر در خلاف جهت جریان استاتور اول است و در نتیجه یک میدان مغناطیسی در مقابل استاتور تولید می‌کند. این میدان مغناطیسی جهت و اندازه نیرو را تعیین می‌کند. جریان استاتور

در روابط فوق،  $R$  ماتریس مقاومت سامانه،  $I_s$  و  $I_a$  به ترتیب جریان های استاتور و پرتابه،  $v_a$  سرعت آرمیچر،  $G$  ماتریس گرادیان اندوکتانس متقابل در جهت حرکت  $(z)$ ،  $L$  ماتریس اندوکتانس خودی،  $M$  ماتریس اندوکتانس متقابل بین سیم پیچی های سامانه و ولتاژ خازن می باشد. فرض می شود که بازده سامانه، نسبت بین منابع انرژی الکتریکی و انرژی جنبشی سامانه کوپل گان القایی است [۲۰].

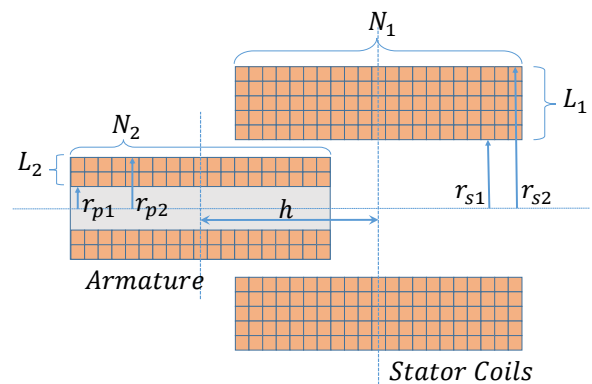
$$\mu = \frac{E_m}{E_e} \times 100 = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{2}C_k V_k^2} \times 100 \quad (9)$$

که در آن،  $\mu$  بازدهی سامانه کوپل گان،  $E_m$  انرژی جنبشی،  $E_e$  انرژی الکتریکی،  $m$  مجموع جرم آرمیچر و پرتابه،  $v$  حداکثر سرعت پرتابه،  $C_k$  خازن منبع توان پالسی و  $V_k$  نیز ولتاژ شارژ خازن است.

### ۳-۲. مدار تحریک

در این بخش، مدار تحریکی که جریان کافی برای تولید میدان مغناطیسی مورد نیاز جهت به جلو راندن پرتابه را فراهم کند، معرفی می شود. بدین منظور، همان طوری که در شکل (۵) نشان داده شده است، یک مدار توان متوسط طراحی شده و برای ایجاد یک پالس جریانی مورد استفاده قرار می گیرد. ولتاژ اولیه بانک خازنی،  $10 \text{ kV}$  بوده و یک دیود هرزگرد نیز به هر سیم پیچی جهت جلوگیری از نوسان پالس جریان متصل می شود. سیم پیچی استاتور متصل به مدار تحریک (ماژول توان پالسی) است در حالی که سیم پیچی آرمیچر در داخل سیم پیچی استاتور در حالت اتصال کوتاه قرار دارد. خازن توان پالسی با استفاده از منبع توان پالس شارژ می شود. همچنین، یک کلید پالسی نیز جهت تعیین زمان بندی دقیق روشن کردن طبقه دوم و سوم، پس از عبور پرتابه از طبقه اول سیم پیچی، اضافه شده است. این کلید نیمه هادی، یک تایریستور تحریک شونده توسط نور (Light-Triggered Thyristors) می باشد که به عنوان نمونه می توان از تایریستور با شماره قطعه LTT T2563NH استفاده نمود. از این تایریستور به عنوان کلید اصلی جهت تأمین دقت زمان کلیدزنی استفاده می شود. این کلید دارای حداکثر ولتاژ قابل تحمل  $8 \text{ kV}$  و حداکثر جریان لحظه ای  $93 \text{ kA}$  می باشد. نرخ رشد بحرانی ولتاژ و جریان قابل تحمل توسط تایریستور فوق، به ترتیب برابر با  $2 \text{ kV}/\mu\text{s}$  و  $5 \text{ kA}/\mu\text{s}$  است که برای سامانه کوپل گان القایی مقادیر مناسبی هستند [۲۴].

لايه هستند. در حالت کلی، بین استاتورها گرادیان اندوکتانس متقابل وجود دارد. با این حال، دیود هرزگرد جریان القاشده را مسدود می کند و بنابراین، هیچ نیرویی بین سیم پیچی استاتور دارای انرژی و سیم پیچی استاتور بعدی وجود نخواهد داشت. گرادیان اندوکتانس متقابل نیز با استفاده از روابط (۴) و (۵) محاسبه می شود. شکل (۴) موقعیت هندسی بین استاتور و سیم پیچی آرمیچر را نشان می دهد. جریان آرمیچر و استاتور توابعی از زمان و موقعیت آرمیچر هستند و باید با استفاده از دستگاه معادلات دیفرانسیلی که مدار معادل را برای یک سیم پیچی آرمیچر و استاتور توصیف می کند، تعیین شوند.



شکل (۴): ساختار هندسی بین سیم پیچی استاتور و آرمیچر

معادلات باقی مانده که مربوط به ولتاژ منابع تغذیه  $U_c$  تابع جریان  $I_s$  هستند، به منبع توان انتخاب شده وابستگی دارند. در این راستا، طبق (۷) و (۸)، باید یک مجموعه مشابه از معادلات دیفرانسیل را برای هر دو سیم پیچی استاتور و آرمیچر حل نمود [۲۳]. روش های رانگ-کوتا (Runge-Kutta) برای «گسسته سازی زمانی» جهت حصول پاسخ معادلات دیفرانسیل مورد استفاده قرار می گیرند. با استفاده از معادلات حالت آورده شده و با بهره گیری از روش محاسبه عددی رانگ-کوتای مرتبه چهارم، سامانه کوپل گان در نرم افزار Matlab مدل شده است.

$$[R] \begin{bmatrix} I_s(t) \\ I_a(t) \end{bmatrix} + v_a [G] \begin{bmatrix} I_s(t) \\ I_a(t) \end{bmatrix} + ([L] + [M]) \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_s(t) \\ I_a(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_c(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

و

$$\frac{dU_c}{dt} = -\frac{1}{C} I_s \quad (8)$$

است از:

$$t_r = (\pi/2)\sqrt{L_{eq}C} \quad (11)$$

که مقدار  $L_{eq}$  از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$L_{eq} = L_s - M_{as} + \frac{(L_a - M_{as})M_{as}}{(L_a - M_{as}) + M_{as}} \quad (12)$$

$$= L_s - \frac{M_{as}^2}{L_a} = L_s \left(1 - \frac{M_{as}^2}{L_s L_a}\right)$$

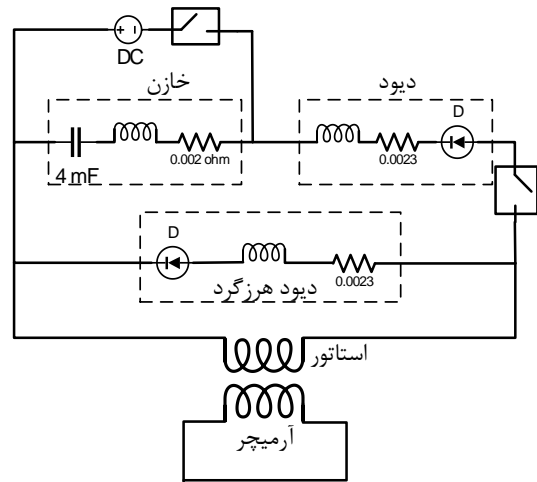
در روابط فوق،  $L_a$  و  $L_s$  به ترتیب اندوکتانس سیم پیچی های آرمیچر و استاتور بوده و  $M_{as}$  نیز اندوکتانس متقابل این دو سیم پیچی می باشد. با محاسبه  $t_r$  و با توجه به شکل (۶)، با فرض اینکه در مدت زمان  $t_r$ ، پرتابه با سرعت ثابتی حرکت می کند، می توان موقعیت مکانی پرتابه که بر اساس آن سیم پیچی استاتور طبقه مورد نظر باید در آن لحظه روشن شود را محاسبه کرد. پارامتر  $Z_{ck}$  موقعیت مرکز طبقه  $k$ ام بوده و  $\lambda_k$  نیز حاصل ضرب  $t_r$  در مقدار سرعت پرتابه است.

جدول (۱): مشخصات طراحی سیم پیچ های سامانه

مقدار		
۱۰	تعداد لایه	سیم پیچ استاتور طبقه اول
۴	تعداد دور در هر لایه	
۲۴۰ uH	اندوکتانس	
۱۰	تعداد لایه	سیم پیچ استاتور طبقه دوم
۴	تعداد دور در هر لایه	
۲۴۰ uH	اندوکتانس	
۱۵	تعداد لایه	سیم پیچ استاتور طبقه سوم
۳	تعداد دور در هر لایه	
۲۴۴ uH	اندوکتانس	
۳۵	تعداد لایه	سیم پیچ آرمیچر
۴	تعداد دور در هر لایه	
۱/۵ mH	اندوکتانس	

جدول (۲): مشخصات خازن ها و پرتابه

مقدار		
۴ mF	مقدار خازن	خازن طبقه اول
۱۰ kV	ولتاژ	
۲ mF	مقدار خازن	خازن طبقه دوم
۱۰ kV	ولتاژ	
۲ mF	مقدار خازن	خازن طبقه سوم
۱۰ kV	ولتاژ	
۱۲۰ mm	قطر	پرتابه
۲۱/۶ kg	وزن	
۱۰۰ m/s	سرعت	



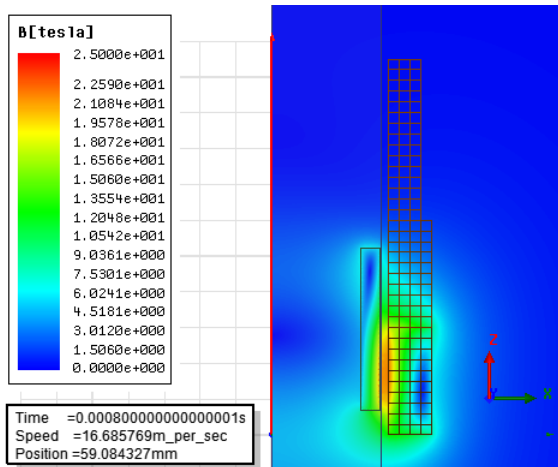
شکل (۵): مدار تحریک برای طبقه اول کویل گان

جدول (۱) مشخصات دقیق طراحی سیم پیچی های استاتور و آرمیچر، از جمله تعداد دور، تعداد لایه ها و مقدار اندوکتانس را نشان می دهد. قابل ذکر است که سه طبقه سیم پیچی استاتور نزدیک به هم قرار داده شده اند؛ زیرا نزدیک بودن فاصله میان سیم پیچی های استاتور منجر به کارایی بالاتر سامانه پرتاب گر می شود. جدول (۲) مشخصات اساسی خازن ها و پرتابه سامانه کویل گان را نشان می دهد. ظرفیت های خازنی منابع توان پالسی به ترتیب برابر  $4, 2, 1$  و  $2$  برای طبقه های ۱، ۲ و ۳ هستند. ظرفیت های خازنی طبقه های دوم و سوم کوچک تر از ظرفیت خازنی طبقه اول هستند، زیرا برای وارد کردن نیرو به پرتابه دارای سرعت، زمان کوتاه تری جهت تخلیه خازن وجود دارد. حداکثر ولتاژ شارژ برابر با  $10 kV$  می باشد. پرتابه با قطری معادل  $120 mm$ ، وزن  $20 kg$  و سرعت  $100 m/s$  در نظر گرفته شده است. زمان روشن کردن کلیدها تحت تأثیر هندسه و موقعیت سیم پیچی استاتور و آرمیچر، با در نظر گرفتن گرادبان اندوکتانس متقابل و شکل موج جریان می باشد. هنگامی که مرکز آرمیچر به مرکز سیم پیچی استاتور طبقات بعدی می رسد، در صورت وجود تحریک در سیم پیچی این طبقات، نیروی وارد شده به پرتابه در جهت رو به جلو خواهد بود. بنابراین سیم پیچی طبقات دوم و سوم استاتور زمانی روشن می شوند که هنگام رسیدن مرکز آرمیچر به مرکز سیم پیچی استاتور، جریان استاتور بیشینه باشد. مدار معادل سیم پیچی استاتور در زمان روشن کردن طبقه مربوطه، به صورت یک مدار (R-L-C) است که جریان تخلیه درون آن دارای فرکانس زیر است:

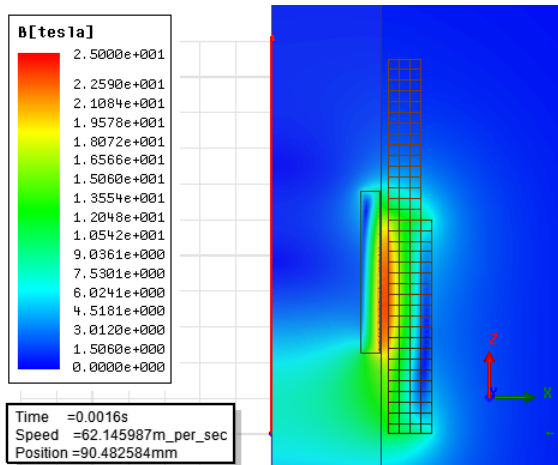
$$f = (2\pi\sqrt{L_{eq}C})^{-1} \quad (10)$$

که در آن،  $L_{eq}$  اندوکتانس معادل و  $C$  ظرفیت خازنی طبقه استاتور است. با توجه به رابطه (۱۰)، زمان خیز جریان عبارت

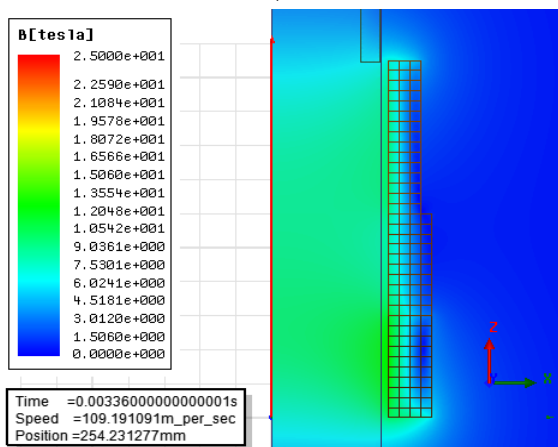
در شکل (۸) توزیع میدان مغناطیسی را در سه موقعیت مختلف آرمیچر در نرم‌افزار اجزای محدود نشان داده شده که بیشترین چگالی میدان مغناطیسی حاصل از سیم‌پیچ‌های استاتور به  $T$  ۲۳ می‌رسد.



(الف)

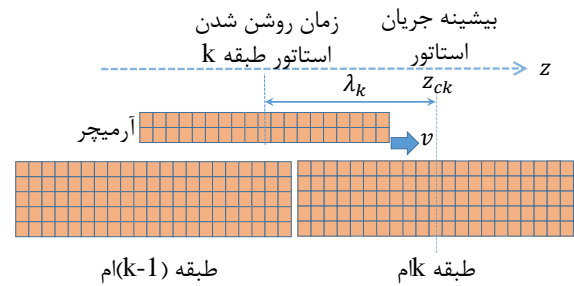


(ب)



(ج)

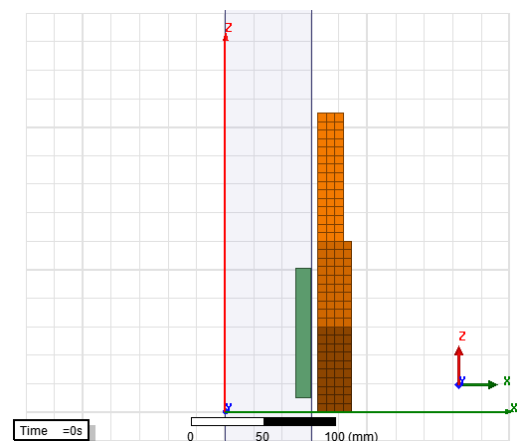
شکل (۸): توزیع میدان مغناطیسی به ازای موقعیت‌های مختلف آرمیچر. (الف) موقعیت  $59 \text{ mm}$ ، (ب) موقعیت  $90 \text{ mm}$ ، (ج) موقعیت  $254 \text{ mm}$ .



شکل (۶): موقعیت آرمیچر در زمان روشن کردن طبقه  $k$ ام

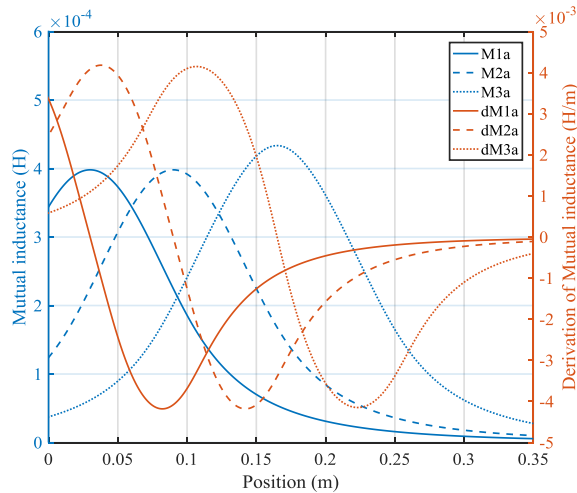
### ۳. نتایج و شبیه‌سازی

جهت تأیید و اعتبارسنجی مدل تحلیلی استخراج‌شده، سامانه کوپل‌گان القایی مذکور به روش اجزاء محدود، با استفاده از نرم‌افزار ANSYS MAXWELL شبیه‌سازی شده است. تحلیل اجزاء محدود سه‌بعدی مستلزم حجم محاسباتی بالا و زمان شبیه‌سازی طولانی، ناشی از ساختارهای پیچیده بوده و نیازمند پردازش‌گر و سخت‌افزار با توان محاسباتی و حافظه بالا می‌باشد. بدین جهت، در این مقاله، تحلیل و شبیه‌سازی دوبعدی پرتاب‌گر کوپل‌گان فوق‌مدنظر قرار گرفته است. این تحلیل، هم‌صحت و هم‌محاسبه سریع را تضمین می‌کند. شکل (۷) مدل دوبعدی سامانه کوپل‌گان را جهت تحلیل اجزاء محدود نشان می‌دهد. می‌توان از مدل تحلیل متقارن دوبعدی جهت شبیه‌سازی سامانه کوپل‌گان القایی، به روش اجزاء محدود استفاده کرد. در این مدل تحلیل اجزاء محدود، سطح مقطع، مشخصات سیم‌پیچی و مدار تحریک اعمال شده است. از نظر موقعیت اولیه سیم‌پیچی آرمیچر، این سیم‌پیچی اندکی بالاتر از مرکز سیم‌پیچی استاتور قرار می‌گیرد. برای رسیدن به بالاترین سرعت پرتابه، مرکز سیم‌پیچی آرمیچر با لبه انتهایی اولین سیم‌پیچی استاتور در جهت پرتاب هم‌تراز شده است. گرادیان اندوکتانس متقابل با توجه به حرکت سیم‌پیچی آرمیچر در جهت پرتاب تغییر می‌کند.

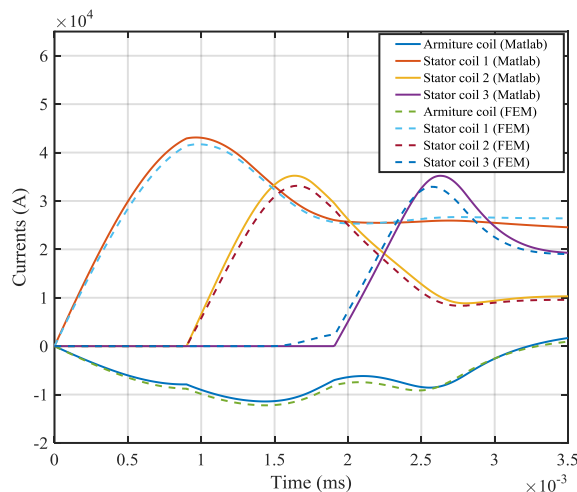


شکل (۷): مدل دوبعدی سامانه کوپل‌گان در نرم‌افزار اجزای محدود.

مغناطیسی سیم‌پیچی استاتور، نیروهای لورنتز را تولید می‌نماید که در نتیجه آن، سیم‌پیچی آرمیچر را پرتاب می‌شود.



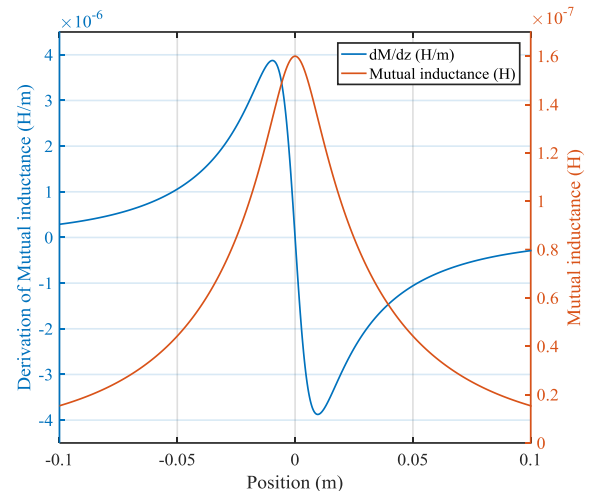
شکل (۱۰): اندوکتانس متقابل و گرادیان اندوکتانس متقابل میان سیم‌پیچی‌های استاتور و آرمیچر



شکل (۱۱): مقایسه نتایج تحلیلی و FEM جریان‌های استاتور و آرمیچر

موقعیت پرتابه در شکل (۱۲) برحسب زمان نشان داده شده است. شکل (۱۳) نیز نیرو و سرعت پرتابه را نشان می‌دهد که حداکثر نیرو و سرعت پرتابه به ترتیب  $1/3 MN$  و  $109 m/s$  بوده و سامانه دارای بازده تقریبی ۳۱ درصد می‌باشد. شکل موج نیرو تحت تأثیر زمان کلیدزنی، اندوکتانس متقابل و جریان‌های سیم‌پیچی قرار می‌باشد. مقایسه بین نتایج تحلیلی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود نشان می‌دهد که مدل اجزاء محدود به خوبی با مدل تحلیلی تطابق دارد. یکی از دلایل وجود اختلاف در نیروی وارد شده به پرتابه، خطای محاسبات در نرم‌افزار Matlab است. این نرم‌افزار حل معادلات حالت را به روش عددی انجام می‌دهد که در آن، مقدار هر متغیر حالت در هر لحظه، وابسته به مقدار قبلی همان متغیر حالت می‌باشد. به

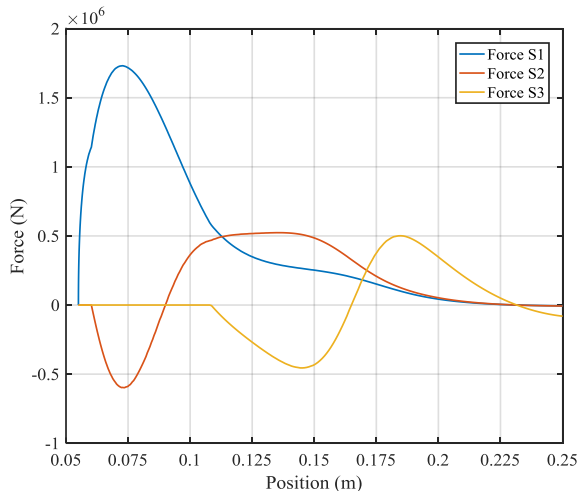
شکل (۹) تغییرات اندوکتانس متقابل و گرادیان اندوکتانس متقابل میان دو حلقه که دارای قطر  $120 mm$  هستند را نشان می‌دهد که در حدود ۸۰٪ مقدار آن‌ها در بازه  $(-60, 60) mm$  قرار گرفته که طول این بازه به‌عنوان حد طول سیم‌پیچی آرمیچر در نظر گرفته می‌شود.



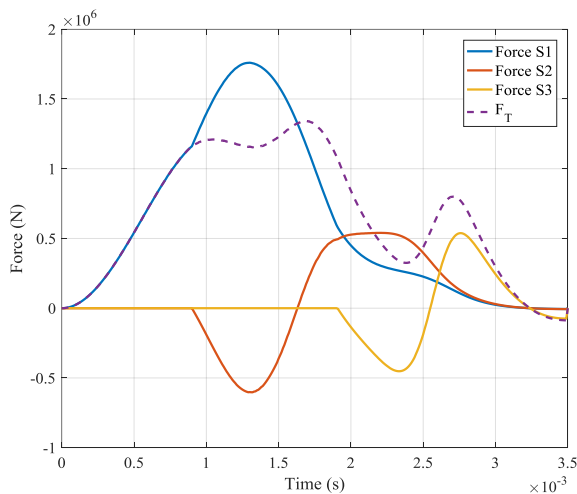
شکل (۹): اندوکتانس متقابل میان دو حلقه دارای قطر  $120$  میلی‌متر

زمان‌های کلیدزنی سیم‌پیچی دوم و سوم بر اساس سرعت و موقعیت سیم‌پیچی آرمیچر و با در نظر گرفتن گرادیان اندوکتانس متقابل و جریان سیم‌پیچی استاتور و آرمیچر برای ایجاد نیروی خالص انتخاب می‌شوند. طبقه دوم در موقعیت  $60 mm$  سیم‌پیچی آرمیچر، راه‌اندازی می‌شود. همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، نیروی پیش‌ران طبقه دوم به‌علت مقدار مثبت گرادیان اندوکتانس متقابل میان سیم‌پیچی استاتور و آرمیچر، منفی است. با این حال، این موقعیت مناسبی برای راه‌اندازی طبقه دوم است زیرا در این موقعیت، نیروی پیش‌ران از اولین سیم‌پیچی استاتور در حال افزایش است و شتاب آن به‌طور قابل‌توجهی ازدیاد می‌یابد. به‌طور مشابه، موقعیت مناسب سیم‌پیچی آرمیچر جهت تحریک طبقه سوم استاتور،  $110 mm$  تعیین می‌شود؛ که در آن نیروی پیش‌ران سیم‌پیچی استاتور دارای مقدار منفی است. بنابراین، قابل‌نتیجه‌گیری است که سیم‌پیچی آرمیچر تنها با طبقه فعلی شتاب نمی‌گیرد، بلکه شتاب آن در اثر طبقات قبلی نیز افزایش می‌یابد. هنگامی که خازن توان پالسی تخلیه می‌شود، پالس جریان از سیم‌پیچی استاتور عبور می‌کند. لذا جریانی در سیم‌پیچی آرمیچر به سبب اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچی استاتور و آرمیچر، در جهت مخالف جریان استاتور ایجاد می‌شود. شکل (۱۱) جریان سیم‌پیچی‌های استاتور و آرمیچر را نشان می‌دهد. حداکثر جریان‌های سیم‌پیچی استاتور و سیم‌پیچی آرمیچر، به ترتیب  $kA$  و  $41$  هستند. برهمکنش جریان القا شده و میدان

شیب بیشتری می‌شود. همین امر، دلیل تغییر شیب نمودار نیروی وارده از طرف استاتور طبقه اول بر سیم‌پیچی آرمیچر است. این دلیل برای سیم‌پیچی‌های طبقات دیگر نیز صادق است؛ که همین نمودار بر حسب زمان نیز در شکل (۱۵) نشان داده شده است.



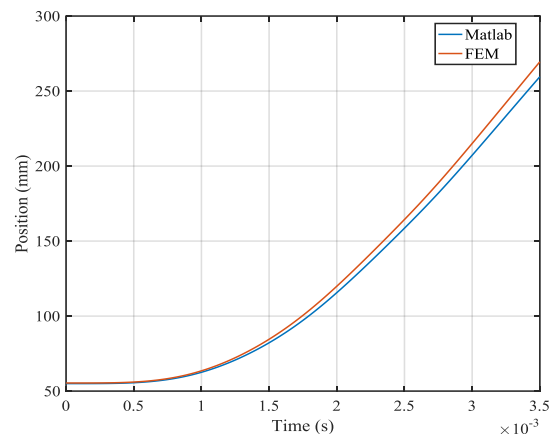
شکل (۱۴): نیروهای رانشی وارد بر پرتابه.



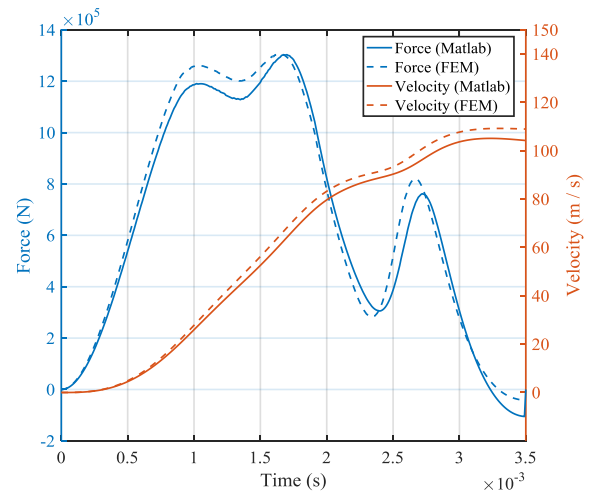
شکل (۱۵): نیروهای رانشی وارد بر پرتابه بر حسب زمان.

در بررسی‌های صورت گرفته در مراجع معتبر، در مورد مسافت طی شده توسط پرتابه اظهار نظری نشده است. چراکه مسافت طی شده به ابعاد پرتابه، ساختار هندسی، جرم آن، زاویه پرتاب، شرایط محیطی و عوامل متعدد دیگری بستگی دارد. همچنین، کمیت سرعت به‌تنهایی جهت ارزیابی سامانه کوپل‌گان، معیار مناسبی نمی‌باشد. معمولاً در اغلب موارد، پرتاب‌کننده‌های الکترومغناطیسی را با دو کمیت سرعت دهانه (سرعت خروج پرتابه از دهانه) و جرم پرتابه، مورد سنجش قرار می‌دهند. سرعت دهانه و جرم پرتابه، کاملاً به‌صورت تنگاتنگ مرتبط با هم، قابلیت تغییر در گستره وسیعی از مقادیر را دارند. بسته به نوع کاربرد

این صورت که مقدار پارامتر محاسبه‌شده در لحظه  $k$ ام جهت محاسبه همان پارامتر در لحظه  $(k+1)$ ام استفاده می‌شود. از این‌رو، فاصله زمانی میان دو گام زمانی حتی‌الامکان باید کوچک در نظر گرفته شود تا میزان خطا کمتر شود. از دیگر دلایل این اختلاف می‌توان به تغییر مقاومت سیم‌پیچی‌ها به‌واسطه عبور جریان از آن‌ها، اشاره کرد. به این صورت که مقاومت با دما رابطه مستقیم دارد که این رابطه، در مدل تحلیلی لحاظ نشده است. همچنین، محاسبه اندوکتانس خودی و متقابل با استفاده از روش تحلیلی، خود دارای مقداری خطاست که در محاسبه نیروی واردشده به پرتابه تأثیر دارد. در مجموع، موارد فوق را می‌توان به‌عنوان منشأ این اختلاف جزئی قلمداد کرد.



شکل (۱۲): مقایسه نتایج تحلیلی و FEM موقعیت پرتابه.



شکل (۱۳): مقایسه نتایج تحلیلی و FEM نیرو و سرعت پرتابه.

در شکل (۱۴) نیروی رانشی وارده از طرف هر یک از طبقه‌ها به پرتابه بر حسب موقعیت آن آورده شده است. در زمانی که فقط سیم‌پیچی طبقه اول دارای جریان است، نیروی وارد بر آرمیچر از حاصل‌ضرب جریان استاتور طبقه اول در جریان آرمیچر و گرادیان اندوکتانس متقابل میان دو سیم‌پیچ به‌دست می‌آید. با روشن شدن سیم‌پیچی طبقه دوم، جریان سیم‌پیچی آرمیچر شروع به افزایش می‌کند که این افزایش موجب ازدیاد نیرو با



## ۵. مراجع

- [1] Ozkan Gurhan, "A methodology to measure the metal recovered armature" Naval postgrade schoole, Monterey, California, December 2001.
- [2] L. Gherman, M. Pearsica, C. Strimbu, and C.-G. Constantinescu, "Induction coilgun based on 'E-shaped' design," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 39, no. 2, pp. 725–729, Feb. 2011.
- [3] K. A. Polzin, J. E. Adwar, and A. K. Hallock, "Optimization of electrodynamic energy transfer in coilguns with multiple, uncoupled stages," IEEE Trans. Magn., vol. 49, no. 4, pp. 1453–1460, Apr. 2013.
- [4] H. D. Fair, "Advances in electromagnetic launch science and technology and its applications," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 1, pp. 225–230, Jan. 2009.
- [5] B. D. Skurdal and R. L. Gaigler, "Multimission electromagnetic launcher," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 1, pp. 458–461, Jan. 2009.
- [6] Xiaobo Niu, Kaipei Liu, Yadong Zhang, Zhenren Xiao, Gang Xiao, Yujia Gong, "Research on self-consistent control strategy of multistage synchronous induction coil launcher", Energy, Volume 144, 2018, Pages 1-9,
- [7] B. Zou, R. Li, M. Wang, D. Yang, and X. Chen, "Research on the Scaling Model of Electromagnetic Coil Launcher," Plasma Science, IEEE Transactions on, vol. 41, pp. 1094–1099, 2013.
- [8] R. Haghmaram, M. Ghaseminezhad, "The Optimized Design of Multistage Induction Coilgun with a Novel Asymmetric Structure," Journal of Applied Electromagnetics, vol. 3, no. 4, pp. 1-8, 1394.
- [9] D. C. Lamppa, C. J. Garasi, A. C. Robinson, T. V. Russo, D. N. Shirley, and M. S. Aubuchon, USA Patent, Sandia National Labs, USA (2008).
- [10] Shoubao Liu, Jiangjun Ruan, Daochun Huang and Zilin Wan, "Analysis of inductive coil gun performance based on field coupling circuit method," 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, Wuhan, 2009, pp. 845-849.
- [11] H. D. Fair, "Advances in electromagnetic launch science and technology and its applications," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 1, pp. 225–230, Jan. 2009.
- [12] T. Zhang et al., "Design and testing of 15-stage synchronous induction coilgun," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 41, no. 5, pp. 1089–1093, May 2013.
- [13] T. Zhang et al., "Experimental results from a 4-stage synchronous induction coilgun," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 41, no. 5, pp. 1084–1088, May 2013.
- [14] B. D. Skurdal and R. L. Gaigler, "Multimission electromagnetic launcher," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 1, pp. 458–461, Jan. 2009.
- [15] Y. S. Jin et al., "Fabrication and testing of a 600-kJ pulsed power system," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 41, no. 10, pp. 2671–2673, Oct. 2013.
- [16] R. J. Kaye, "Operational requirements and issues for coilgun electromagnetic launchers," IEEE Trans. Magn., vol. 41, no. 1, pp. 194–199, Jan. 2005.
- [17] B. E. Fridman, "Transients in pulsed electrical circuits with massive conductors," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 34, no. 5, pp. 1938–1943, Oct. 2006.
- [18] Y. Zhang, J. Ruan, Y. Wang, Z. Du, S. Liu, and Y. Zhang, "Performance improvement of a coil launcher," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 39, no. 1, pp. 210–214, Jan. 2011.
- [19] J. He, E. Levi, Z. Zabar, and L. Birenbaum, "Concerning the design of capacitively driven induction coil guns," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 17, no. 3, pp. 429–438, Jun. 1989.

این سامانه، جرم پرتابه و سرعت دهانه لازم تعیین می‌شوند. طبق گزارش‌های فنی موجود، به کمک این فناوری، با جرم پرتابه‌ای در حد چندین گرم، سرعت‌هایی در حد چندین ماخ نیز حاصل شده است. همچنین، در جرم‌های پرتابه بالا، در حد چندین کیلوگرم نیز از کویل‌گان استفاده شده است. حتی گزارش‌هایی وجود دارد که حاکی از توانایی پرتاب ماهواره توسط سامانه کویل‌گان می‌باشد. برد کویل‌گان با توجه به نوع ساختار آن‌ها متفاوت است. هرچه کویل‌گان دارای تعداد طبقات بیشتری باشد، سرعت دهانه افزایش یافته و برد بیشتری نیز حاصل خواهد شد. در جدول (۳) مشخصات فنی مربوط به تعدادی از سامانه‌های کویل‌گان چندطبقه، برگرفته از مراجع معتبر، آورده شده است.

جدول (۳): نمونه‌های موجود در مقالات معتبر.

مرجع	جنس پرتابه	جرم پرتابه (kg)	ظرفیت خازن (mF)	تعداد طبقات	سرعت خروجی دهانه (m/s)
[۲۵]	آلومینیوم	۵	۸-۴	۱۵	۲۱۹
[۶]	آلومینیوم	۰/۲	۱	۲۵	۵۹۵
[۲۶]	مس	۱/۶۲	۲-۵-۲۰	۳	۲۵۰
[۲۷]	آلومینیوم	----	۴-۶-۲۰	۳	۳۷۴
[۲۸]	----	۰/۴۱۳	۰/۲۴	۵	۵۰
[۲۹]	آلومینیوم	۰/۶	۱	۳	۶۴
[۳۰]	مس	----	۲	۴	۲۱۶

## ۴. نتیجه‌گیری

این مقاله به بحث در مورد طراحی، تجزیه و تحلیل الکترومغناطیسی مربوط به سامانه کویل‌گان القایی چندطبقه با ماژول توان پالسی می‌پردازد. نتایج با استفاده از نرم‌افزار تحلیل اجزاء محدود ANSYS Maxwell به‌دست آمده است. در این راستا، ولتاژ، جریان، اندوکتانس متقابل، نیرو، سرعت، شتاب و بازده سامانه کویل‌گان القایی چندطبقه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. به‌منظور تأیید صحت و اعتبارسنجی خروجی‌ها، نتایج شبیه‌سازی به‌روش اجزاء محدود، با نتایج حاصل از روش تحلیلی مقایسه شده‌اند و هم‌خوانی قابل قبولی بین آن‌ها برقرار بوده است. در این تحلیل، نیرو و سرعت پرتابه به‌ترتیب برابر با  $1/3 MN$  و  $109 m/s$  و همچنین سامانه دارای بازده تقریبی ۳۱ درصد می‌باشد که هدف طراحی را برآورده می‌سازد. بنابراین، ویژگی‌های طراحی و نتایج تحلیل اجزاء محدود می‌تواند به‌طور مؤثری برای ساخت یک سامانه کویل‌گان در مقیاس بزرگ استفاده شود.

- [26] Z. Du et al., "Performance Analysis of a Coil Launcher Based on Improved CFM and Nonoverlapping Mortar FEM," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 41, no. 5, pp. 1070-1076, May 2013.
- [27] X. Tao, S. Wang, Y. Huangfu, S. Wang and Y. Wang, "Geometry and Power Optimization of Coilgun Based on Adaptive Genetic Algorithms," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 43, no. 5, pp. 1208-1214, May 2015.
- [28] X. Niu, K. Liu, Y. Zhang, G. Xiao and Y. Gong, "Multiobjective Optimization of Multistage Synchronous Induction Coilgun Based on NSGA-II," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 7, pp. 1622-1628, July 2017.
- [29] W. Liu, C. Cao, Y. Zhang, J. Wang and D. Yang, "Parameters Optimization of Synchronous Induction Coilgun Based on Ant Colony Algorithm," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 39, no. 1, pp. 100-104, Jan. 2011.
- [30] X. Guan, S. Wang, S. Guan, D. Guo and B. Liu, "Study on the Best Trigger Position of Multistage Induction Coil Launcher," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, no. 5, pp. 2419-2423, May 2019.
- [20] Y. Cao, W. Liu, R. Li, and Y. Zhang, "Study of discharge position in multi-stage synchronous inductive coilgun," IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 1, pp. 518-521, Jan. 2009.
- [21] M. Song, D. Le, B. Go, M. Park and I. Yu, "Design of an Attractive Force Circuit of Pulsed Power System for Multistage Synchronous Induction Coilgun," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 46, no. 10, pp. 3606-3611, Oct. 2018.
- [22] B. Go, D. Le, M. Song, M. Park and I. Yu, "Design and Electromagnetic Analysis of an Induction-Type Coilgun System With a Pulse Power Module," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, no. 1, pp. 971-976, Jan. 2019.
- [23] M. Song et al., "Development and Experimental Results of a Three-Stage Induction Coilgun," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, no. 5, pp. 2438-2444, May 2019.
- [24] D. Le, B. Go, M. Song, M. Park and I. Yu, "Development of a Capacitor Bank-Based Pulsed Power Supply Module for Electromagnetic Induction Coilguns," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 47, no. 5, pp. 2458-2463, May 2019.
- [25] T. Zhang et al., "Investigation of Magnetic Field Arrangement on Launching Performance of Multistage Synchronous Induction Coilgun," in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 45, no. 7, pp. 1436-1442, July 2017.

---

**Design and Electromagnetic Analysis of a Three Stage Induction  
Coil-gun System Utilizing the Finite Element Method**

**M. Baharvand<sup>1</sup>, A. Dehestani Kolagar<sup>1\*</sup>, M. R. Alizadeh<sup>3</sup>**

**Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology,  
Iran**

(Received: 29/02/2020; Accepted: 112/06/2020)

**Abstract**

*This paper deals with the electromagnetic design and analysis of a three-stage induction coil-gun system. First, the operating principles of a multistage coil-gun system are briefly introduced and, in the following, in order to analyze and calculate the voltage, current, force, speed and acceleration, a transient finite-element simulation of the projectile motion is performed utilizing the ANSYS Maxwell software. Furthermore, to validate the design accuracy of the electromagnetic launcher, using its state space equations, simulations are performed in the MATLAB software and the analytical results are compared with the results obtained from electromagnetic analysis. The designed system has an efficiency of about 31% and it is capable of launching a projectile of 21.6 kg at an output speed of 109 m/s. The design features and the results of the analysis can be effectively utilized to develop a large-scale multistage induction-type coil-gun system.*

**Keywords:** Induction Coilgun, Electromagnetic Analysis, Multistage Coilgun, Pulse Power Module

---

\* Corresponding author E-mail: a\_dehestani@mut.ac.ir